

KONTROL POSISI PADA SISTEM PELAYANGAN MAGNETIK MENGGUNAKAN KONTROL PID

Tsaabit Taqiyyuddin¹, Agus Suprajitno², Jenny Putri Hapsari³

^{1, 2, 3} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Unissula

^{1, 2, 3} Gedung Fakultas Teknologi Industri Unissula, Jalan Raya Kaligawe Km. 4 Semarang

¹tsaabit@std.unissula.ac.id

Abstrak – Sistem pelayangan magnetik merupakan teknologi yang memanfaatkan kemagnetan yang dihasilkan dari magnet untuk membuat suatu benda dapat melayang. Sistem ini memanfaatkan sifat dari magnet yang dapat menarik besi. Selain itu sifat magnet yang dapat tarik menarik saat dihadapkan pada kutub magnet yang berbeda ataupun tolak menolak saat dihadapkan pada kutub magnet yang sama. Di Indonesia sendiri masih sedikit pengembangan dari sistem pelayangan magnetik ini. Hal ini disebabkan masih minimnya pengetahuan tentang sistem pelayangan magnetik ini. Maka dari itu perlu dibuatnya sebuah alat yang mampu membantu memahami sistem pelayangan magnetik ini, khususnya dari kalangan akademik.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dirancang sebuah modul untuk simulasi dari fenomena pelayangan magnetik ini. Modul ini juga dirancang untuk dapat dikontrol dengan kontrol PID dengan sensor HC-SR04 sebagai feedback dari sistem. Untuk metode tuning yang digunakan adalah metode kurva reaksi Ziegler-Nichols dimana mudah dipahami dan dilakukan.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah objek dapat dilayangkan dengan arus minimal 1,6 Ampere dan ketinggian maksimal adalah 34,8 mm pada input pwm 250, tegangan 24,18 volt dan arus 2,85 A. Objek dapat dilayangkan dengan stabil dengan menggunakan tipe kontroler PID dengan nilai $K_p = 0,6$, $K_d = 0,12$, dan $K_i = 0,03$

Kata kunci: Sistem pelayangan magnetik, PID, metode Ziegler-Nichols.

Abstract – Magnetic levitation system is a technology that utilizes magnetism generated from magnets to make an object levitate or float. This system utilizes the character of magnets that can attract iron. Besides the magnetic character that pull each other when faced with different magnetic poles or repel each other when faced with the same magnetic pole. In Indonesia, there is still little development of this magnetic levitation system. This is due to the lack of knowledge about this magnetic levitation system. Therefore it is necessary to make a tool that is able to help understand the magnetic levitation system, especially from the academic community.

Therefore, in this study a module was designed to simulate the phenomenon of magnetic levitation. This module is also designed to be controlled by PID control with HC-SR04 sensor as feedback from the system. The tuning method used is the Ziegler-Nichols reaction curve method which is easy to understand and do.

The results obtained from this study are the object can be levitated with a minimum current of 1.6 Amperes and the maximum height is 34.8 mm at 250 pwm input, voltage 24.18 volts and 2.85 A current. The object can be levitated stably using the PID controller with $K_p = 0.6$, $K_d = 0.12$, and $K_i = 0.03$

Key words: Magnetic levitation system, PID, Ziegler-Nichols method.

I. PENDAHULUAN

Sistem pelayangan magnetik merupakan teknologi yang memanfaatkan kemagnetan yang dihasilkan dari magnet untuk membuat suatu benda dapat melayang. Sistem ini memanfaatkan sifat dari magnet yang dapat menarik besi. Selain itu sifat magnet yang dapat tarik menarik saat dihadapkan pada kutub magnet yang berbeda ataupun tolak menolak saat dihadapkan pada kutub magnet yang sama.

Di Indonesia sendiri masih sedikit pengembangan dari sistem pelayangan magnetik ini. Hal ini disebabkan masih minimnya pengetahuan tentang sistem pelayangan magnetik ini. Maka dari itu perlu dibuatnya sebuah alat yang mampu membantu memahami sistem pelayangan magnetik ini, khususnya dari kalangan akademik.

Pada umumnya, sistem ini menggunakan elektromagnet. Elektromagnet yang digunakan berupa magnet kumparan. Penggunaan elektromagnet juga memungkinkan untuk mengatur keluaran besarnya kemagnetan yang

dihasilkan. Sehingga dalam proses melayangkan suatu benda, dapat diatur besarnya kemagnetan yang diterapkan pada benda tersebut. Hal ini memungkinkan untuk mengatur posisi ataupun ketinggian pelayangan tersebut.

Agar dapat melayangkan benda pada posisi yang diinginkan dengan stabil maka diperlukan kontrol pada sistem ini. Salah satu metode kontrol yang populer adalah kontrol PID. Dalam penggunaan kontrol PID dibutuhkan penalaan untuk mendapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d . Metode penalaan kurva reaksi dari Ziegler-Nichols dipilih karena lebih mudah dipahami dan dilakukan.

II. LANDASAN TEORI

A. Solenoida

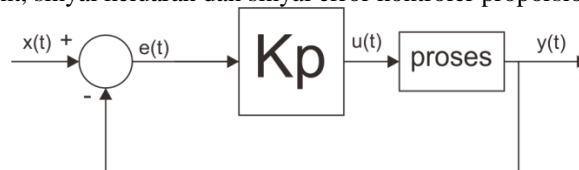
Solenoida merupakan sebuah elektromagnet dengan bentuk yang paling sederhana. Solenoida dibuat dari kawat penghantar yang digulung membentuk sebuah lilitan atau lebih. Saat arus listrik dialirkan pada gulungan penghantar tersebut, maka sebuah medan magnet dihasilkan. Faktor yang dapat mempengaruhi besarnya medan magnet yang dihasilkan oleh gulungan atau kumparan tersebut adalah diantaranya, yaitu jumlah lilitan(loop atau turns), besarnya arus yang mengalir dan bahan inti solenoida tersebut. Banyaknya lilitan mempengaruhi luas daerah yang berinteraksi, untuk besar arusnya mempengaruhi aktivitas, dan bahan dari inti solenoida mempengaruhi resistansi listrik. Inti kumparan harus berupa bahan ferromagnetik.[1]

B. Magnet Neodymium

Magnet neodymium adalah magnet permanen paling kuat. Magnet ini sejenis magnet tanah jarang yang terbuat dari campuran logam neodymium. Senyawa ini memberi magnet ini potensi untuk mempunyai koersivitas (ketahanan untuk mengalami kerusakan magnetik). Senyawa ini juga cenderung rentan terhadap korosi. Untuk mencegahnya biasanya dengan dilapisi nikel atau dengan dua lapis yaitu tembaga dengan nikel. Bisa juga menggunakan polimer atau pernis sebagai bahan pelapisnya.[1]

C. Kontroler Proporsional

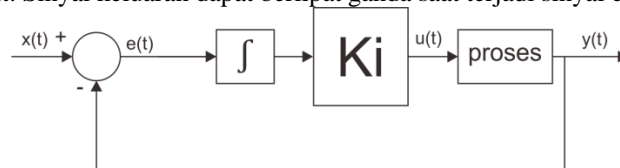
Kontroler proporsional bekerja sebagai penguat sinyal. Keluaran dari kontroler proporsional sebanding dengan besarnya sinyal error yang terjadi. Dapat dikatakan bahwa kontroler proporsional merupakan perkalian konstanta proporsional(K_p) dengan sinyal error(e). Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem kontrol proporsional, hubungan antara sinyal set point, sinyal keluaran dan sinyal error kontroler proporsional.[2]



Gambar 1 Diagram blok sistem kontrol proporsional

D. Kontroler Integral

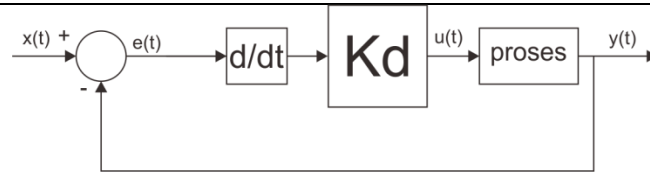
Kontroler integral memiliki fungsi untuk memperbaiki respon sistem jika terjadi error steady state. Pada sebuah sistem tanpa kontroler integral, respon sistemnya dapat terjadi sebuah error steady state. Error steady state ini terjadi saat respon sistem mencapai keadaan steady state namun tidak sinyal keluaran tidak mampu mencapai sinyal set point. Dengan penggunaan kontroler integral ini, error steady state ini dapat diperbaiki. Kontroler integral bekerja seperti sebuah integrator, yang sama dengan sebuah integral. Perubahan sinyal error sangat mempengaruhi kinerja dari kontroler integral. Perubahan sinyal error yang terjadi sebanding dengan sinyal keluaran kontroler integral. Saat tidak terjadi perubahan sinyal error, maka sinyal keluaran kontroler ini akan berharga sama seperti sebelum terjadi error tersebut. Sinyal keluaran dapat berlipat ganda saat terjadi sinyal error berurutan.[2]



Gambar 2 Diagram blok sistem kontrol integral

E. Kontroler Diferensial

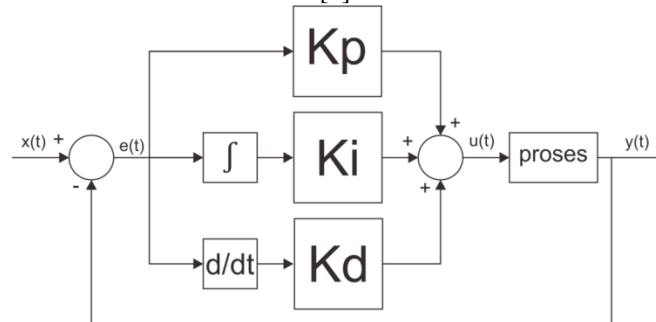
Kontroler diferensial bekerja seperti sebuah operasi derivatif. Perubahan sinyal error yang terjadi pada suatu sistem kontrol, dapat mengakibatkan perubahan keluaran yang terlalu signifikan. Sinyal keluaran akan berbentuk impuls jika sinyal masukan sebuah plant dinaikkan secara mendadak(sinyal step), sedangkan sinyal keluaran akan berbentuk step dengan magnitudo yang besar jika sinyal masukan dinaikkan secara perlahan (sinyal ramp). Untuk itu kontroler diferensial digunakan untuk memperbaiki sinyal keluaran tersebut saat terjadi perubahan sinyal error yang mendadak.[2]



Gambar 3 Diagram blok sistem kontrol diferensial

F. Kontroler PID

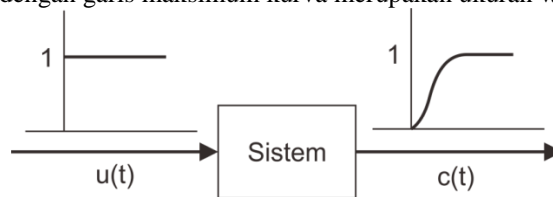
Kontroler PID merupakan gabungan dari kontroler proporsional, kontroler integral, dan kontroler diferensial. Kontroler ini dapat menutupi kekurangan dari ketiga kontroler tersebut. Ketiga kontroler tersebut digabungkan secara paralel yaitu dengan menjumlahkan sinyal keluaran kontroler proporsional, kontroler integral, dan kontroler diferensial. Kontroler PID ini secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat respon suatu sistem kontrol, menghilangkan offset, dan menghasilkan sinyal perubahan awal yang signifikan. Besarnya nilai konstanta proporsional, konstanta integral dan konstanta diferensial akan mempengaruhi karakteristik respon dari masing-masing komponen kontroler PID tersebut. Karakteristik respon sistem dapat dibuat lebih kuat pada satu atau dua konstanta dengan menaikkan nilai konstanta tersebut.[2]



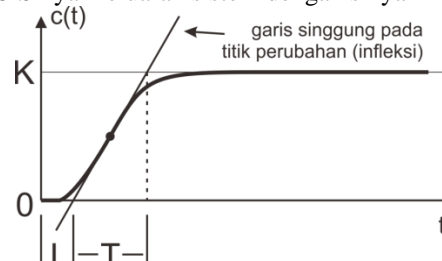
Gambar 4 Diagram blok sistem kontrol PID

G. Metode Kurva Reaksi Ziegler-Nichols

Metode penalaan Ziegler-Nichols ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1942. Ziegler-Nichols memperkenalkan dua metodenya yaitu metode kurva reaksi dan metode osilasi. Dalam penggunaan metode kurva reaksi Ziegler-Nichols, sistem dibuat open loop terlebih dahulu. Kemudian sistem open loop tersebut diberi sebuah masukan sinyal step sehingga respon sistem berbentuk kurva S seperti ditunjukkan pada gambar 5. Kurva S tersebut memiliki dua parameter yaitu waktu mati (L) dan waktu tunda (T). Dari gambar 6 setelah selang waktu L, kurva mulai naik. Waktu tunda merupakan perubahan kurva hingga mencapai 66 % dari keadaan steady state. Kemudian dibuat garis singgung seperti pada gambar 6. Garis tersebut memotong sumbu axis dan garis maksimum kurva yang diperoleh. Waktu dari awal sinyal masukan diberikan dan perpotongan garis singgung dengan sumbu axis merupakan waktu mati (L). Sedangkan waktu dari perpotongan garis singgung dengan sumbu axis dan garis singgung dengan garis maksimum kurva merupakan ukuran waktu tunda (T).[2]



Gambar 5 Sinyal keluaran sistem dengan sinyal masukan step



Gambar 6 Penggambaran garis singgung pada kurva S

Setelah didapatkan parameter L dan T, kemudian konstanta proporsional, konstanta integral, dan konstanta diferensial dapat diperoleh dengan menggunakan rumus pada tabel 1.

Tabel 1 Penalaan parameter PID dengan metoda kurva reaksi

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	T/L	~	0
PI	0.9 T/L	L/0.3	0
PID	1.2 T/L	2L	0.5L

H. PWM

PWM (Pulse Width Modulation) merupakan sebuah cara memanipulasi sinyal yang dinyatakan sebagai pulsa dalam suatu periode waktu. Hasil dari manipulasi sinyal tersebut adalah tegangan rata-rata yang berbeda. Beberapa contoh aplikasi penggunaan PWM adalah modulasi data untuk telekomunikasi, pengontrolan tegangan pada motor DC, regulator tegangan, penguatan dan yang lainnya. Aplikasi PWM pada mikrokontroler biasanya berupa pengendalian motor DC, pengaturan sudut motor servo dan juga pengaturan redup nyala LED.

Pada PWM digital yang digunakan pada mikrokontroler, nilainya dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri. Misalkan sebuah mikrokontroler memiliki PWM digital 8 bit, maka PWM tersebut memiliki resolusi $2^8 = 256$. Hal ini berarti keluaran PWM dari mikrokontroler tersebut memiliki 256 variasi nilai dari 0 hingga 255 yang mewakili duty cycle 0% hingga 100% dari keluaran tersebut.[3]

I. Arduino Nano



Gambar 7 Antarmuka Arduino Nano 328

Arduino merupakan sebuah mikrokontroler open source berbasis ATmega328p. Arduino Nano dilengkapi koneksi USB Mini-B, 6-20 V catu daya eksternal yang tidak diregulasi (pin 30), atau 5 V catu daya eksternal yang diregulasi (pin 27). Sumber daya secara otomatis memilih sumber tegangan yang paling tinggi. Arduino Nano memiliki 32 KB memori Flash dengan 2 KB digunakan untuk bootloader serta 2 KB SRAM dan 1 KB EEPROM. Masing-masing dari 14 pin digitas pada Arduino Nano bisa digunakan sebagai input maupun output, menggunakan fungsi pinMode(), digitalWrite(), dan digitalRead(). Semua itu beroperasi pada tegangan 5V. Setiap pin dapat menerima atau memberi arus maksimal 40 mA dan mempunyai resistor pull-up internal sebesar 20-50 kOhm. Arduino Nano mempunyai 8 pin input analog, masing-masing memiliki resolusi 10 bit. Standarnya, diukur dari ground (0 V) hingga 5 V, meskipun dapat ditingkatkan dengan menggunakan fungsi analogReference(). Pin 25 (A6) dan pin 26 (A7) tidak dapat digunakan sebagai pin digital. Pin 23 (A4) dan pin 24 (A5) memiliki fungsi lain yaitu I2C. pin A4 sebagai SDA dan pin A5 sebagai SCL. Pin ini mendukung komunikasi I2C (TWI) dengan menggunakan library Wire.[4]

J. Sensor HC-SR04



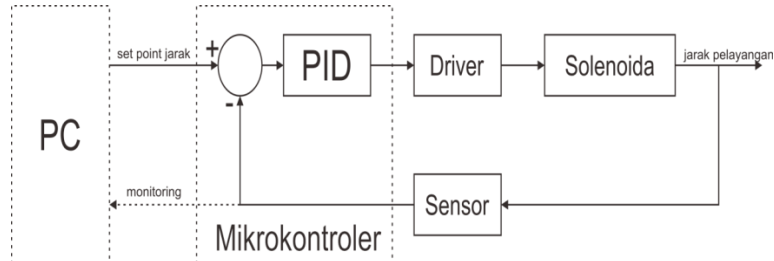
Gambar 8 Sensor HC-SR04

HC-SR04 merupakan modul sensor jarak yang memanfaatkan gelombang ultrasonik. Sensor ini bekerja pada tegangan 5 volt dengan pin VCC untuk supply dan pin GND untuk 0 volt. Sensor ini dapat mendeteksi jarak sejauh 2cm hingga 400cm dengan tanpa sentuhan. Akurasi pengukuran dapat mencapai 3mm. modul ini terdiri dari

ultrasonic transmitters, ultrasonic receiver dan control unit. Cara kerja sensor ini ,pertama dengan memberikan sinyal high selama 10us pada pin trigger pulse input. Selanjutnya modul akan mengirim delapan 40kHz secara otomatis dan mendeteksi kapan sinyanya terpantul kembali. Saat sinyal kembali, dengan mendeteksi waktu saat kondisi high melalui pin echo pulse output, maka waktu pantulan didapatkan. Dikarenakan cepat rambat bunyi di udara adalah 340m/s ,maka dapat dihitung jarak yang terbaca adalah waktu pantulan dikalikan cepat rambat bunyi kemudian dibagi dua.[5]

III. PERANCANGAN ALAT

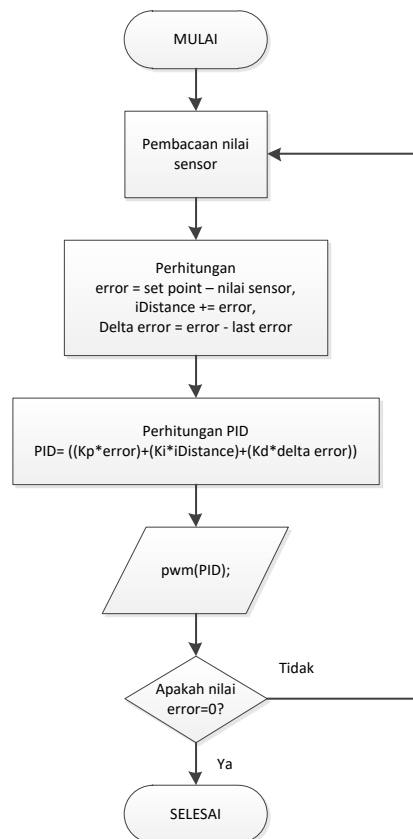
A. Perancangan Hardware



Gambar 9 Diagram sistem pelayangan magnetik

Pada gambar 9 merupakan diagram sistem dari hardware yang dibuat. Mikrokontroler Arduino Nano 328 digunakan sebagai pusat dari sistem kontrol. Catu daya yang digunakan adalah power supply 24volt 10A dengan stepdown untuk mencatu Arduino Nano. Sensor jarak yang digunakan merupakan sensor ultrasonic HC-SR04. Untuk mengatur output dari mikrokontroler ke solenoid digunakan modul driver BTS7960.

B. Perancangan Software



Gambar 10 Diagram alur program sistem kontrol PID

Gambar 10 menunjukkan gambaran alur dari program kontrol PID dari modul ini. Program dimulai dengan masukan set point pada sistem. Kemudian sistem melakukan pembacaan nilai jarak melalui sensor HC-SR04 yang kemudian digunakan sebagai nilai masukan oleh Arduino Nano dan kemudian diproses. Data dari sensor jarak dan nilai set point diproses untuk menghitung nilai error, yaitu selisih dari nilai set point dengan nilai sensor jarak. Setelah diperoleh nilai error tersebut, dilanjutkan proses berikutnya, yaitu perhitungan nilai PID. Setelah diperoleh nilai PID, maka nilai PID tersebut akan digunakan sebagai nilai output berupa PWM yang kemudian diberikan kepada modul driver BTS7960. Alur program tersebut akan terus berulang. Dari pembacaan sensor hingga pemberian output PWM. Sistem akan terus melakukan koreksi hingga sistem mencapai nilai set point.

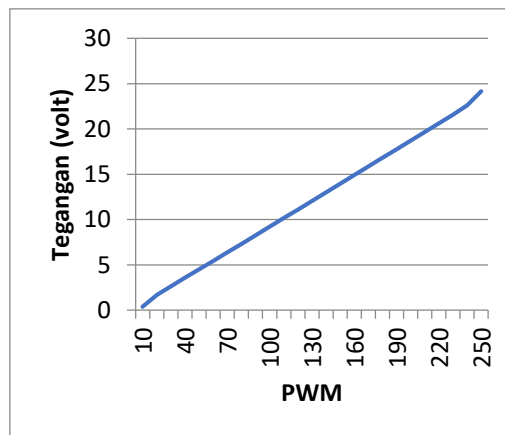
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Solenoida dan Sensor HC-SR04

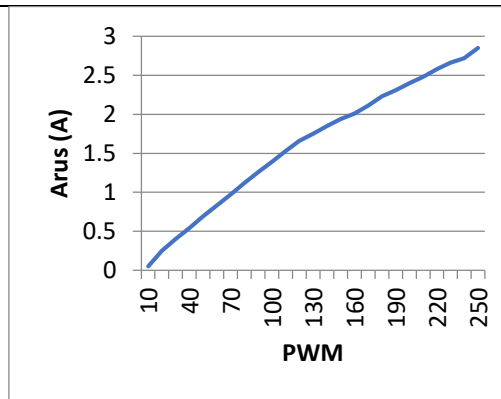
Tabel 2 Hasil pengujian solenoida dan sensor HC-SR04 dengan input PWM

No.	PWM	Tegangan (volt)	Arus (A)	Jarak terbaca sensor (mm)		Jarak terukur alat ukur (mm)	
				awalan bawah	awalan atas	awalan bawah	awalan atas
1	10	0,38	0,05	0	0	0	0
2	20	1,69	0,25	0	0	0	0
3	30	2,64	0,4	0	5	0	13,5
4	40	3,6	0,54	0	17	0	19
5	50	4,5	0,69	0	20	0	23,2
6	60	5,44	0,83	0	26	0	25
7	70	6,38	0,97	0	26	0	27,5
8	80	7,32	1,12	0	29	0	28,6
9	90	8,27	1,26	0	30	0	29,9
10	100	9,22	1,39	0	30	0	30,8
11	110	10,15	1,53	0	30	0	31
12	120	11,1	1,66	31	31	31	31
13	130	12,04	1,75	32	32	32	32
14	140	12,99	1,85	32	32	32	32
15	150	13,94	1,94	32	32	32,5	32,5
16	160	14,9	2,01	33	33	33	33
17	170	15,85	2,11	33	33	33	33
18	180	16,8	2,23	33	33	33	33
19	190	17,75	2,31	33	33	33,7	33,7
20	200	18,71	2,4	33	33	33,7	33,7
21	210	19,68	2,48	34	34	33,7	33,7
22	220	20,62	2,58	34	34	33,8	33,8
23	230	21,58	2,66	34	34	34	34
24	240	22,6	2,72	35	35	34,3	34,3
25	250	24,18	2,85	35	35	34,8	34,8

Tabel 2 merupakan data hasil pengujian solenoida terhadap input PWM 10 hingga 250. Pengujian dilakukan untuk mengamati perubahan tegangan dan arus pada solenoida terhadap input PWM yang diberikan. Pada pengujian ini juga diambil data nilai sensor yang terbaca dan nilai jarak yang sebenarnya dengan diukur menggunakan jangka sorong.

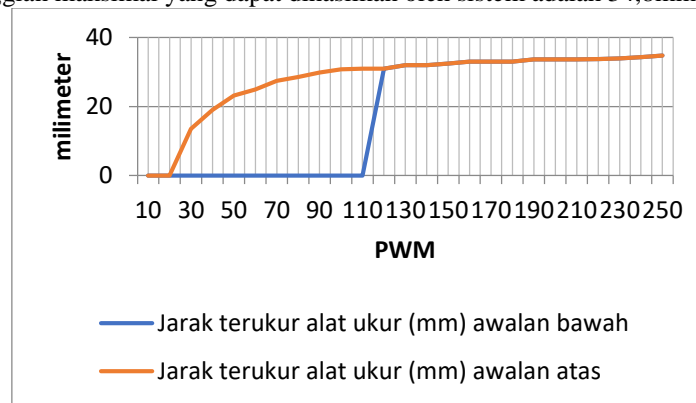


Gambar 11 Grafik perubahan tegangan solenoida terhadap input PWM sebesar 10-250

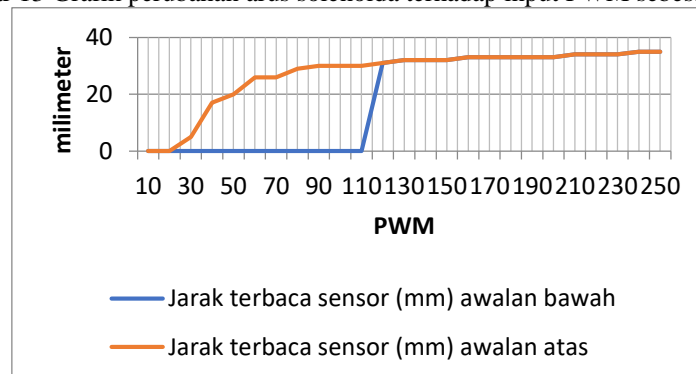


Gambar 12 Grafik perubahan arus solenoida terhadap input PWM sebesar 10-250

Pada gambar 11 dan gambar 12 didapatkan grafik perubahan tegangan dan arus pada solenoida yang berubah secara linear dengan penambahan pada input PWM dengan tegangan maksimal 24,1 dan arus maksimal 2,85 ampere. Dilihat dari gambar 13 dan gambar 14, dapat dikatakan sensor ini memiliki selisih yang sedikit dari jarak yang sebenarnya. Ketinggian maksimal yang dapat dihasilkan oleh sistem adalah 34,8mm.



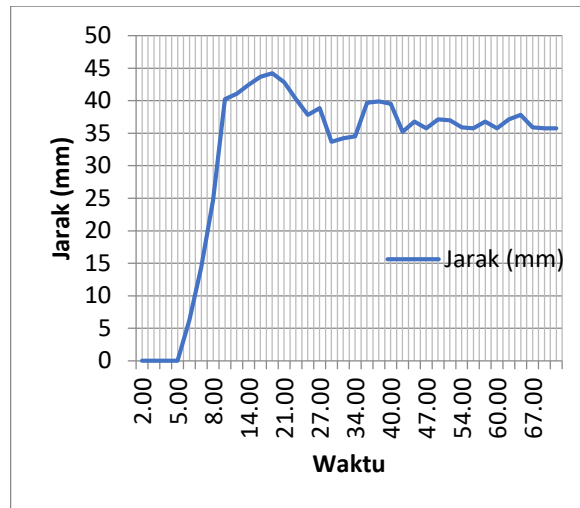
Gambar 13 Grafik perubahan jarak terukur alat ukur terhadap input PWM sebesar 10-250



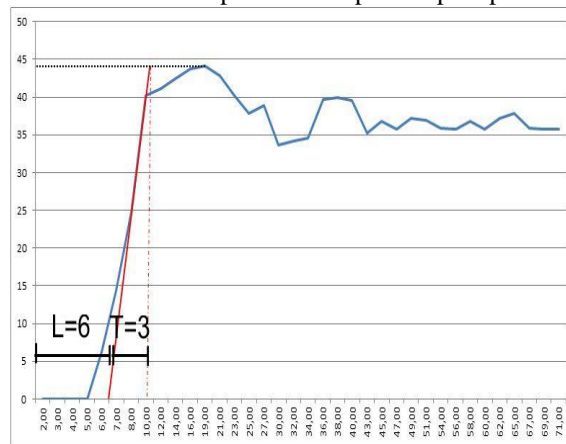
Gambar 14 Grafik perubahan jarak yang terbaca sensor HC-SR04 terhadap input PWM sebesar 10-250

B. Tuning Konstanta PID dengan Metode Kurva Reaksi Ziegler-Nichols

Pada gambar 15 didapat grafik respon sistem open-loop tanpa kontrol. Dari hasil pengamatan respon tersebut dimana digambarkan pada gambar 16, maka diperoleh parameter $L=0,06$ detik dan $T=0,03$ detik dikarenakan waktu pada data dikalikan 0,01 detik.



Gambar 15 Grafik respon sistem open-loop tanpa kontrol



Gambar 16 Penarikan garis singgung pada perubahan (infleksi) berdasarkan grafik respon yang didapat. Setelah didapatkan 2 parameter tersebut, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d . Perhitungan dilakukan berdasarkan pada tabel 1 dengan perhitungan sebagai berikut:

1. Perhitungan untuk tipe kontroler P

$$K_p = \frac{T}{L} = \frac{0,03}{0,06} = 0,5$$

$$K_i = \infty$$

$$K_d = 0$$

2. Perhitungan untuk tipe kontroler PI

$$K_p = 0,9 \frac{T}{L} = 0,9 \times \frac{0,03}{0,06} = 0,45$$

$$K_i = \frac{T}{0,3} = \frac{0,03}{0,3} = 0,1$$

$$K_d = 0$$

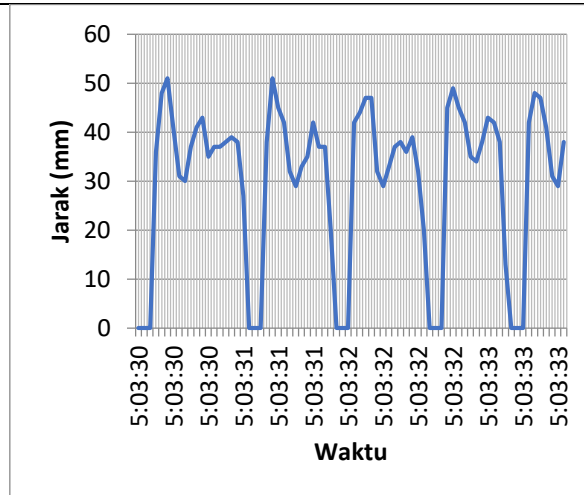
3. Perhitungan untuk tipe kontroler PID

$$K_p = \frac{T}{L} = 1,2 \times \frac{0,03}{0,06} = 0,6$$

$$K_i = 2L = 2 \times 0,06 = 0,12$$

$$K_d = 0,5L = 0,5 \times 0,06 = 0,03$$

C. Pengujian Respon Tipe Kontroler P

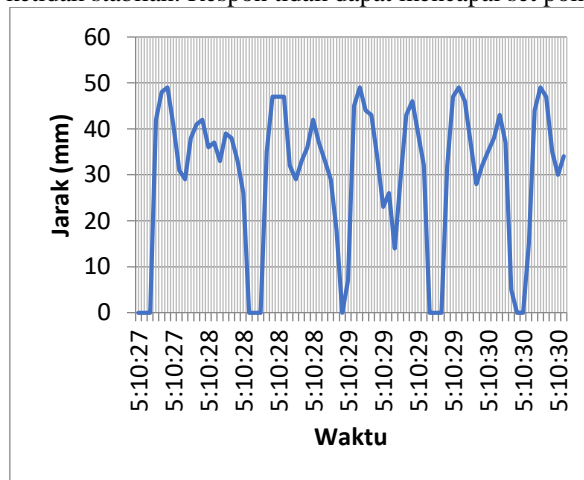


Gambar 17 Grafik respon tipe kontroler P dengan input setpoint 30mm

Pengujian ini dilakukan untuk melihat respon sistem dengan tipe kontroler P saat diberi masukan berupa set point 30mm. Dari hasil pengujian, didapat grafik responnya yang digambarkan pada gambar 17. Dilihat dari grafik tersebut, respon menunjukkan ketidak stabilan. Respon tidak dapat mencapai set point yang diberikan.

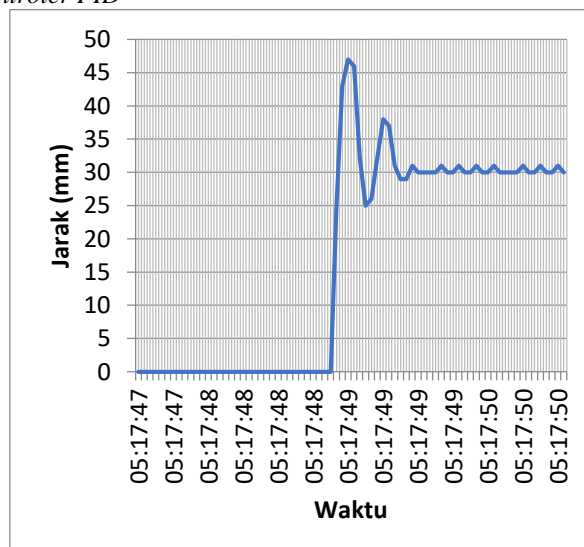
D. Pengujian Respon Tipe Kontroler PI

Pengujian ini dilakukan untuk melihat respon sistem dengan tipe kontroler PI saat diberi masukan berupa set point 30mm. Dari hasil pengujian, didapat grafik responnya yang digambarkan pada gambar 18. Dilihat dari grafik tersebut, respon menunjukkan ketidak stabilan. Respon tidak dapat mencapai set point yang diberikan.



Gambar 18 Grafik respon tipe kontroler PI dengan input setpoint 30mm

E. Pengujian Respon Tipe Kontroler PID



Gambar 19 Grafik respon tipe kontroler PID dengan input setpoint 30mm

Pengujian ini dilakukan untuk melihat respon sistem dengan tipe kontroler PID saat diberi masukan berupa set point 30mm. Dari hasil pengujian didapat grafik responnya yang digambarkan pada gambar 19. Dilihat dari grafik tersebut, respon menunjukkan kestabilan. Respon dapat mencapai set point yang diberikan setelah 2 detik. Pada grafik terlihat adanya overshoot diawal dikarenakan untuk menaikan objek dengan kondisi awalan bawah, dibutuhkan arus minimal 1,6 dan langsung naik tinggi lebih dari 30 mm. Kemudian setelah overshoot, sistem mulai stabil kembali dan mencapai set point. Dilihat dari grafik tersebut, nilai overshoot mencapai 47mm.

V. SIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari hasil tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Kekuatan magnet yang dihasilkan solenoida dapat diatur dengan mengatur besar tegangan yang diberikan pada solenoida. Cara ini juga digunakan untuk mengatur posisi objek yang dilayangkan oleh sistem.
2. Nilai konstanta PID yang didapat dari hasil tuning dengan metode kurva reaksi Ziegler-Nichols adalah $K_p=0,6$, $K_i=0,12$ dan $K_d=0,03$.
3. Penggunaan kontrol PID dapat diterapkan menggunakan mikrokontroler Arduino Nano sebagai pengontrol tegangan pada solenoida.
4. Ketinggian maksimal yang dihasilkan pada saat melayangkan objek adalah 34,8mm pada input pwm 250, tegangan 24,18 volt dan arus 2,85 A.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada semua pihak yang telah membantu sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. B. Wibowo and S. Sutomo, "PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM CONTROL MAGNETIC LEVITATION BALL," *ROTASI*, vol. 13, no. 2, pp. 1–7, 2011.
- [2] elektro indonesia, "ELEKTRO INDONESIA -TUTORIAL," *www.elektroindonesia.com*, 1998. [Online]. Available: <https://www.elektroindonesia.com/elektro/tutor12.html>. [Accessed: 14-Feb-2019].
- [3] R. Prayogo, "Pengaturan PWM (Pulse Width Modulation) dengan PLC," *pengaturan PWM*, p. 24, 2012.
- [4] "Arduino Nano." [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. [Accessed: 09-Sep-2019].
- [5] "HC-SR04 Project – SwanRobotics." [Online]. Available: https://www.swanrobotics.com/projects/hc-sr04_project/. [Accessed: 09-Sep-2019].